

УДК 621.771.23:681.5.015.2

*О. Г. КУРПЕ, В. В. КУХАР***ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СМУГИ ПЕРЕД ТЕРМОМЕХАНІЧНОЮ ПРОКАТКОЮ НА СТАНІ СТЕККЕЛЯ**

В роботі вдосконалено математичну модель зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою та виконані розрахунки для умов стану Стеккеля. Вдосконалення моделі здійснено за рахунок врахування впливу конвекційного теплового потоку. Моделювання процесу зміни температурного поля здійснено для умов охолодження смуги розмірами 40х1510 мм зі сталі марки Х65, відповідно до вимог стандарту API-5L, що була нагрітою до температури 825 °С в пічній моталці, з метою подальшої прокатки на стані Стеккеля. По результатах моделювання встановлено, що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових кромках смуги. Для мінімізації впливу на механічні властивості смуги більш охолоджених бокових кромок запропоновані варіанти підвищення температури при нагріванні, шляхом перерозподілу температури в пічному просторі, або її збереження перед прокаткою на стані. Виконано оцінку впливу конвекції при моделюванні зміни розподілу температури смуги по ширині по режимах термомеханічної прокатки в діапазоні технологічних температур 800-825 °С, вплив конвекції становить 93%. В порівнянні з режимами гарячої прокатки, в діапазоні технологічних температур 1050-1100 °С, вплив конвекції становить 1%, що підтверджує доцільність виконаної розробки. Вдосконалену модель можливо використовувати для розрахунків зміни розподілу температури плоского прокату, який виробляється по режимах гарячої прокатки, термомеханічної прокатки та її різноманітних варіантів реалізації (високотемпературної та низькотемпературної), а також нормалізуючої прокатки.

**Ключові слова:** математична модель, температурне поле, конвекційний тепловий потік, термомеханічна прокатка, стан Стеккеля.

*А. Г. КУРПЕ, В. В. КУХАРЬ***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОЛОСЫ ПЕРЕД ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКАТКОЙ НА СТАНЕ СТЕККЕЛЯ**

В работе усовершенствована математическая модель изменения температурного поля полосы перед термомеханической прокаткой и выполнены расчеты для условий стана Стеккеля. Совершенствование модели выполнено за счет учета влияния конвекционного теплового потока. Моделирование процесса изменения температурного поля реализовано для условий охлаждения полосы размерами 40х1510 мм из стали марки Х65, в соответствии с требованиями стандарта API-5L, которая была нагрета до температуры 825 °С в печной моталке, с целью дальнейшей прокатки на стане Стеккеля. По результатам моделирования установлено, что более интенсивное охлаждение наблюдается на боковых кромках полосы. Для минимизации влияния на механические свойства полосы более охлажденных боковых кромок предложены варианты повышения температуры при нагревании, путем перераспределения температуры в печном пространстве, или ее сохранения перед прокаткой на стане. Выполнена оценка влияния конвекции при моделировании изменения распределения температуры полосы по ширине по режимам термомеханической прокатки в диапазоне технологических температур 800-825 °С, влияние конвекции составляет 93%. По сравнению с режимами горячей прокатки, в диапазоне технологических температур 1050-1100 °С, влияние конвекции составляет 1%, что подтверждает целесообразность выполненной разработки. Усовершенствованную модель возможно использовать для расчетов изменения распределения температуры плоского проката, который производится по режимам горячей прокатки, термомеханической прокатки и ее различных вариантов реализации (высокотемпературной и низкотемпературной), а также нормализующей прокатки.

**Ключевые слова:** математическая модель, температурное поле, конвекционный тепловой поток, термомеханическая прокатка, стан Стеккеля.

*О. Н. КУРПЕ, В. В. КУХАР***REFINEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF STRIP TEMPERATURE FIELD CHANGE BEFORE THE THERMOMECHANICAL ROLLING AT THE STECKEL MILL**

In the paper the mathematical model of strip temperature field change before the thermomechanical rolling has been refined and the calculations have been performed for the Steckel rolling mill conditions. The refinement of the model has been performed due to the accounting of the influence of the thermal-convection current. The simulation of the temperature field change process has been performed for conditions of strip cooling with dimensions 40х1510 mm produced of steel grade X65, in accordance with API-5L standard requirements. The strip has been heated to up to 825 °С in the furnace coiler for further rolling at the Steckel mill. Subsequent to the results of modelling there has been determined that the more enhanced cooling has been observed on the side edges of the strip. For minimization of more cooled side edges impact on the strip mechanical properties the options of the temperature raise have been offered at heating, by means of temperature distribution within the furnace area, or the temperature conservation before rolling at the mill. There has been carried out the evaluation of the convection influence when modelling the change of the strip temperature distribution along the width within the thermomechanical rolling patterns in the range of technological temperatures 800-825 °С. The convection influence constitutes 93%. In comparison to hot rolling patterns, the convection influence constitutes 1% in the range of the technological temperatures 1050-1100 °С. This fact supports the appropriateness on the performed development. The refined model can be applied for calculations of temperature distribution change for flat-rolled products that are produced under the hot rolling schedule, thermomechanical rolling schedule and of its various types of implementation (high temperature and low temperature) and also normalized rolling.

**Key words:** mathematical model, temperature field, thermal-convection current, thermomechanical rolling, Steckel mill.

**Вступ.** Розвиток обчислювальної техніки спонукав поширенню досліджень, що виконуються методами математичного моделювання. Ці методи дозволяють поглибити існуючі знання про фізичні процеси металургії та розробити превентивні методи впливу на кінцевий результат. Тенденція з

дослідження, у тому числі, процесів обробки металів тиском через їх математичне моделювання замість існуючих аналітичних залежностей, у більшості випадків, є науковою тенденцією, що відкриває нові можливості для проектування обладнання та нового рівня технології.

© О. Г. Курпе, В. В. Кухар, 2019

**Аналіз стану питання.** Найбільш сучасною та наукоємною технологією обробки металів тиском на теперішній час є технологія термомеханічної обробки, або термомеханічної прокатки (“thermo-mechanical control process”, далі ТМСР). Ця технологія поглиблено вивчається та вдосконалюється більш ніж останні 30 років, одночасно з вдосконаленням відповідного промислового та випробувального устаткування [1-4].

Поміж тим, вивчення технології ТМСР методами математичного моделювання дозволяє отримати більше важелів для її тонкого керування.

Так, відомо, що при термомеханічній прокатці великий вплив на отримання кінцевих механічних властивостей має дотримання необхідної технологічної температури перед початком аустенітного перетворення, а також мінімізація коливань температури по ширині та довжині прокату [5-9]. Поглиблене вивчення температурних процесів, які відбуваються при обробці металів тиском через математичне моделювання, серед х інших наведено в роботах авторів [10-13]. Особливу цікавість представляє робота [10], в якій автори вивчають змінення температури одночасно з фазовим перетворенням при охолодженні в процесі змотування рулону. В роботі [11] автори вивчають вплив температурних полів та теплових потоків на форму смуги, з можливістю керування в режимі реального часу. Вплив температурних полів на дефекти форми смуги автори роботи [12] вивчають зворотнім тримірним методом. Слід зазначити, що в цих роботах нахил вивчення зроблено на широкий діапазон змінення температур гарячої прокатки, в той час як технологія ТМСР має вузький температурний коридор, що потребує окремого додаткового вивчення.

**Мета роботи.** Метою дослідження є пошук такої форми температурного поля, яке повинен мати підкат по ширині після нагрівання, щоб безпосередньо перед прокаткою, яку проводять в кліті Стеккеля, він мав необхідний градієнт розподілу температур.

**Основна частина.** Відповідно до сучасного уявлення теорії теплопереносу, передача тепла від тіл які нагріті вище температури червоного світіння, відбувається головним чином випромінюванням. Вплив конвекційного механізму теплопередачі зі зниженням температури поверхні заготовки збільшується.

Особливістю стану Стеккіля є те, що впродовж процесу прокатки температуру можна утримувати на необхідному рівні завдяки наявності двох пічних моталок, тобто на рівні, необхідному для здійснення термомеханічного процесу. Тому, при розрахунку процесу ТМСР, враховували теплопередачу випромінюванням та конвекцією.

Відома математична модель зміни температурного поля нерівномірно нагрітої смуги що охолоджується [13], яка включає залежності для розрахунку температури довільного проміжного (і-го) шару заготовки, шару з максимальною теплоємністю та шару на кромці, доповнена врахуванням конвекційного теплового потоку, відповідно до закона

Ньютона-Рихмана:

$$\partial Q = \alpha (t - t_{o.c}) \cdot \partial F \cdot \partial \tau, \quad (1)$$

де  $t$  – температура смуги, оС;

$t_{o.c}$  – температура довкілля, оС;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\partial F$  – елементарна площа перерізу, нормально до якій проходить тепловий потік;

$\partial \tau$  – елементарний проміжок часу.

Після врахування залежності (1), математична модель для розрахунку температури довільного проміжного (і – го) шару заготовки (в проміжку часу  $j - 1$ ) має наступний вигляд:

$$t_{i,j-1} = t_{i,j} + Fo_{\Delta x} (t_{i-1,j} - 2t_{i,j} + t_{i+1,j}) - Fo_{\Delta x} \times \frac{\sigma \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} \times \left[ (t_{i,j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - Fo_{\Delta x} \times \frac{\alpha \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} (t_{i,j} - 20), \quad (2)$$

де  $\Delta x$  – ширина елементарного об'єму шару, м;

$Fo_{\Delta x}$  – критерій Фур'є для елементарного об'єму шириною  $\Delta x$ , м;

$\sigma$  – коефіцієнт випромінювання чорного тіла;

$B_{0п}$  – ширина смуги, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності для матеріалу полоси при заданих умовах, Вт/м·град;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Критерій Фур'є розраховували по відомій залежності:

$$Fo_{\Delta x} = a_T \cdot \Delta \tau / \Delta x^2, \quad (3)$$

де  $a_T$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/год;

$\Delta \tau$  – елементарний проміжок часу, год.

В свою чергу коефіцієнт температуропровідності  $a_T$  визначали по формулі:

$$a_T = \lambda / \rho_3 \cdot c, \quad (4)$$

де  $\rho_3$  – щільність сталі, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – середня теплоємність, кДж/(кг·К).

Вдосконалена модель також включає залежності для розрахунку фізичних та теплофізичних властивостей низьковуглецевих, або вуглецевих марок сталі, що є найбільш наближеними до марок, які використовуються в технології ТМСР, які отримані шляхом обробки даних робіт [14-16]. Для розрахунку цих властивостей розроблено по кілька залежностей для різних діапазонів температур, що забезпечило отримання коефіцієнту вірогідності апроксимації  $R^2$  більш ніж 0,90.

Зокрема, для розрахунку коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$  маловуглецевих сталей отримані залежності для двох діапазонів температур застосування:

для температури обробки сталі від 100 °С до 900 °С

$$\lambda = -0,0363t + 59,381. \quad (5)$$

для температури обробки сталі >900 °С до 1200 °С

$$\lambda = 20,848e^{0,0003t}. \quad (6)$$

Результати обробки даних для отримання залежностей (5) та (6) наведені на рис. 1

Для розрахунку середньої теплоємності вуглецевої сталі с отримані наступні залежності: для температури обробки сталі від 100 °С до 800 °С

$$c = 0,4556e^{0,0005t} \quad (7)$$

для температури обробки сталі >800 °С до 1300 °С

$$c = -3 \times 10^{-5}t + 0,7211 \quad (8)$$

Результати обробки даних для отримання залежностей (7) та (8) наведені на рис. 2

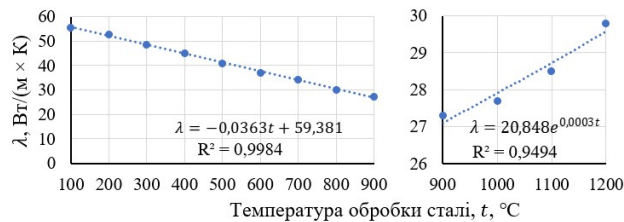


Рис. 1 – Визначення залежності теплопровідності  $\lambda$  від температури  $t$

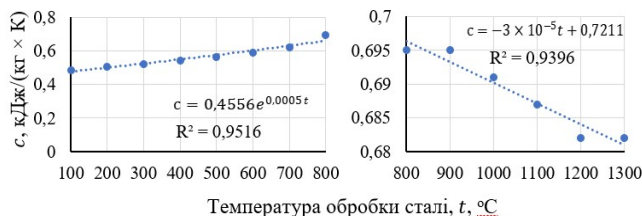


Рис. 2 – Визначення залежності теплоємності  $c$  від температури  $t$

температури  $t$

Відомо, що при термомеханічній прокатці важливо мати розподіл температур, який не повинен перевищувати 25°С по ширині, що на кінцевій стадії обробки забезпечить мінімальну анізотропію механічних властивостей прокату.

Апробація розробленої математичної моделі з метою оцінки розподілу температур по ширині після нагрівання, перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля, виконана при наступних умовах: матеріал смуги – сталь марки Х65 відповідно до вимог стандарту API-5L; розміри смуги: товщина –  $h_0 = 40$  мм, ширина –  $B_0 = 1510$  мм; температура нагрівання смуги в пічній моталці  $t = 825$  °С; час між виходом смуги з пічної моталки до початка її прокатування становить 8 сек.

Хімічний склад сталі що використовувалась в дослідженні наведений в табл. 1.

Базовий розподіл температури смуги на половині ширини, після нагрівання в пічній моталці, який буде використовуватися для подальшого математичного моделювання, наведений в табл. 2.

Результати моделювання наведені на рис. 3.

По результатах моделювання, більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових кромках смуги.

Для мінімізації впливу на механічні властивості смуги більш охолоджених бокових кромки, необхідно скорегувати режим нагрівання зі зміною розподілу температур по перерізу пічної моталки, або встановити екранування бокових кромки між пічною моталкою та станом.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі що використовувалась в дослідженні

Марка сталі	Хімічний склад, %														
	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N	B
X65	0,09	1,4	0,23	0,002	0,011	0,036	0,03	0,066	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,007	0,0005

Таблиця 2 – Базовий розподіл температури смуги на половині ширини

Показник	Значення показника											
Відстань від кромки смуги, мм	75,5	151	226,5	302	377,5	453	528,5	604	679,5	755	792,75	
Температура, °С	825	825	826	827	827	829	830	830	831	832	833	

Для оцінка впливу конвекції на розподіл температури по ширині смуги, на підставі вдосконаленої математичної моделі, виконано розрахунок для умов гарячої та термомеханічної прокатки.

Вхідні дані, які були використані для розрахунків, наведені в табл. 3.

Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні зміни температури смуги по двох

технологіях прокатки наведені на рис. 4.

По результатах моделювання та оцінки впливу конвекції отримані наступні результати:

– при реалізації режимів ТМСП в діапазоні температур 800°С – 825 °С, втрати тепла конвекцією на кромці смуги становлять 93%, тобто з загального зниження температури на кромці, яке становить 17,93 °С, зниження за рахунок конвекції становить 16,72 °С.

Таблиця 3 – Дані що використані при розрахунках по різних технологія

Технологія	Товщина смуги, мм	Ширина смуги, мм	Температура після пічної моталки, °C	Час охолодження смуги, сек
Гаряча прокатка	40	1400	1100	140
TMCP	40	1510	825	8

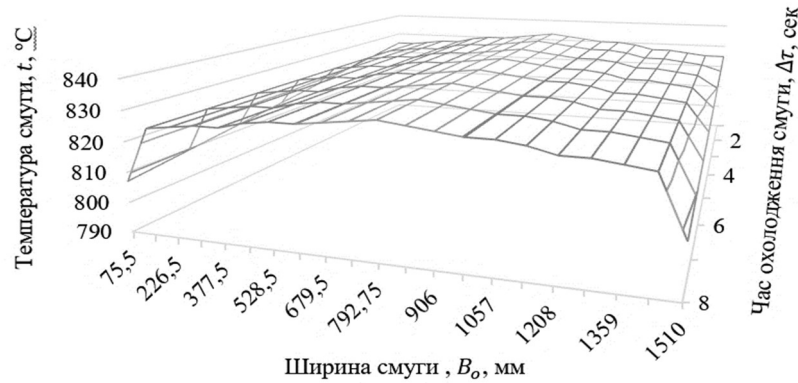


Рис. 3 – Результати моделювання розподілу температури смуги по режимах TMCP

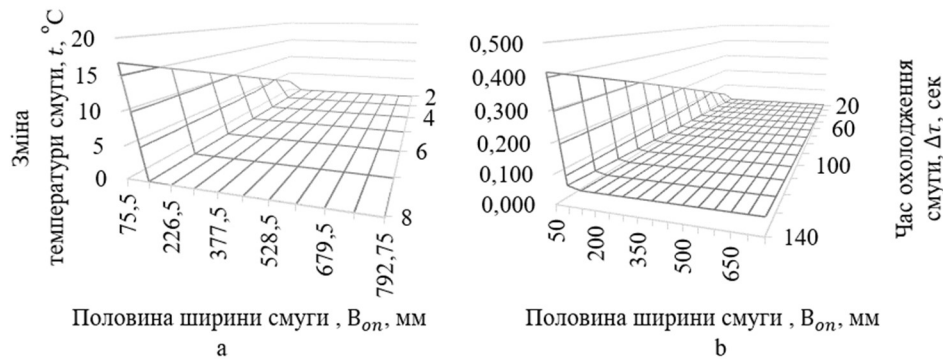


Рис. 4 – Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні розподілу температури по ширині смуги: а – по режимах TMCP, б – та по режимах гарячої прокатки

Ближче до центру смуги вплив конвекції суттєво зменшується.

– при реалізації режимів гарячої прокатки в діапазоні температур 1050 °C – 1100 °C, втрати тепла конвекцією на кромці смуги становлять лише 1%, тобто з загального зниження температури на кромці, яке становить 41,69 °C, зниження за рахунок конвекції становить лише 0,42 °C.

**Висновки.** Вдосконалено математичну модель зміни розподілу температурного поля смуги по ширині за рахунок врахування конвекційного теплового потоку.

Виконано оцінку впливу конвекції при моделюванні зміни розподілу температури смуги по ширині по режимах TMCP, який становить 93%, тоді як по режимах гарячої прокатки, вплив конвекції становить лише 1%.

Встановлено, що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових кромках смуги.

Запропоновано рішення для вирівнювання температури бокових кромки через корегування режиму нагрівання в пічній моталці або екранування.

Вдосконалену модель можливо використовувати для розрахунків зміни розподілу температури плоского прокату, який виробляється по режимах гарячої прокатки, термомеханічної прокатки та її різноманітних варіантів реалізації (високо температурної та низько температурної), а також нормалізуючої прокатки.

#### Список літератури

1. Zinchenko Yu. A. Kurpe A. G., Bagmet O. A. Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine, *Metallurgist*, Vol. 52, Nos. 7–8, 2008. pp. 461–463, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.
2. Militzer M. Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, *Materials Processing*. Vol. 1, 2014. pp. 191–216, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.
3. Sir Harshad Bhadeshia. Thermomechanical Treatment of Steels, *Microstructure and Properties (Fourth edition)*, 2017. pp. 271–301, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.
4. Lenard J. G. Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process, *Primer on Flat Rolling*, Elsevier Ltd, 3 (2007) 36–98.
5. Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels, *Journal of University of Science and*

- Technology. Beijing, Vol. 15, 2008. pp. 396–401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).
6. Korczak P., Dyja H. Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 2001. pp. 112–119. PII: S 0924-0136(00)00784-6.
  7. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Prisyazhnyi A. Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena* Vol. 291, 2018, pp. 63–71.
  8. Kurpe O., Kukhar V. Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium, Collective monograph*, Volume 1 Stalowa Wola, Poland 2018, pp. 281–298.
  9. Xiangwei Kong, Liangyun Lan. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling, *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP*, 2014. pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
  10. Daniel Weisz-Patrault. Coupled heat conduction and multiphase change problem accounting for thermal contact resistance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. P. 595–606, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.091.
  11. Daniel Weisz-Patrault, Alain Ehrlicher, Nicolas Legrand. Temperature and heat flux fast estimation during rolling process, *International Journal of Thermal Sciences*, 2014. P. 1–20, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.010.
  12. Daniel Weisz-Patrault. Inverse three-dimensional method for fast evaluation of temperature and heat flux fields during rolling process, *Symposium on Modelling of Rolling Processes*, 2012, France, P.20–22.
  13. Кухарь В. В., Присяжный А. Г., Балалаева Е. Ю., Тузенко О. А., Курпе А. Г., Анищенко А. С., Кармазина И. В. Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств, *Мариуполь: ПГТУ*, 2018. 144 с.
  14. Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. И. Методические нагревательные печи, *М.: Металлургиздат*, 1964.
  15. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник, Ред. Тымчака В. М., Гусовского В. Л., *М.: Металлургия*, 1983.
  16. Казанцев Е. И. Промышленные печи, *М.: Металлургия*, 1975.
  3. Sir Harshad Bhadeshia. Thermomechanical Treatment of Steels, *Microstructure and Properties (Fourth edition)*, 2017. pp. 271–301, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.
  4. Lenard J. G. Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process, *Primer on Flat Rolling, Elsevier Ltd*, 3 (2007) 36–98.
  5. Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels, *Journal of University of Science and Technology*. Beijing, Vol. 15, 2008. pp. 396–401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).
  6. Korczak P., Dyja H. Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 2001. pp. 112–119. PII: S 0924-0136(00)00784-6.
  7. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Prisyazhnyi A. Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena* Vol. 291, 2018, pp. 63–71.
  8. Kurpe O., Kukhar V. Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium, Collective monograph*, Volume 1 Stalowa Wola, Poland 2018, pp. 281–298.
  9. Xiangwei Kong, Liangyun Lan. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling, *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP*, 2014. pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
  10. Daniel Weisz-Patrault. Coupled heat conduction and multiphase change problem accounting for thermal contact resistance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. P. 595–606, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.091.
  11. Daniel Weisz-Patrault, Alain Ehrlicher, Nicolas Legrand. Temperature and heat flux fast estimation during rolling process, *International Journal of Thermal Sciences*, 2014. P. 1–20, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.010.
  12. Daniel Weisz-Patrault. Inverse three-dimensional method for fast evaluation of temperature and heat flux fields during rolling process, *Symposium on Modelling of Rolling Processes*, 2012, France, P.20–22.
  13. Kukhar V. V., Prisyazhnyy A. G., Balalaeva E. Ju., Tuzenko O. A., Kurpe A. G., Anishhenko A. S., Kamazina I. V. Upravlenie teplovym sostojaniem tonkolistovogo prokata dlja povysheniya ravnomernosti raspredelenija mehanicheskix svojstv, *Mariupol: PGTU*, 2018. 144 p.
  14. Tajc N. Ju., Rozengart Ju. I. Metodicheskie nagrevatel'nye pechi, *Moscow: Metallurgizdat*, 1964.
  15. Raschet nagrevatel'nyh i termicheskix pechej. Spravichnik, Red. Tymchaka V. M., Gusovskogo V. L., *Moscow: Metallurgija*, 1983.
  16. Kazancev E. I. Promyshlennye pechi, *Moscow: Metallurgija*, 1975.

#### References (transliterated)

Надійшла (received) 16.05.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Курпе Олександр Геннадійович (Kurpe Aleksandr Gennadiyovich)** – кандидат технічних наук, ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ», головний експерт, Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-7239>; e-mail: [aleksandr.kurpe@gmail.com](mailto:aleksandr.kurpe@gmail.com)

**Кухар Володимир Валентинович (Kukhar Volodymyr Valentynovych)** – доктор технічних наук, професор, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», завідувач кафедри обробки металів тиском, Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>; e-mail: [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com)